تحلیل خطر و ریسک زلزلهٔ سدها (مطالعهٔ موردی سد چاه‌نیمهٔ ۱ زابل)★

(یادداشت پژوهشی)

علی کمک‌پناه [۱]   حمیدرضا رحمانی [۲]

چکیده *زلزله در طول تاریخ سرمنشأ بسیاری از خرابی‌ها و تلفات انسانی قابل‌توجه بوده‌است و همواره نگرانی‌های زیادی درخصوص تخریب سازه‌های عظیمی چون سدها، به‌واسطهٔ زیان‌های مالی و جانی قابل‌توجه ناشی از آن و نیز رها شدن کنترل‌نشدهٔ آب به‌سمت شهرها و روستاهای متمرکز در پایین‌دست آن وجود داشته‌است. یکی از پرکاربردترین روش‌های مقابله با خطرهای زلزله، تحلیل ریسک لرزه‌ای سازه‌ها می‌باشد. در این تحقیق به بررسی انواع تحلیل ریسک‌های لرزه‌ای مورداستفاده در سدها پرداخته شده‌است و تحلیل خطر زلزله برای سد چاه‌نیمهٔ زابل انجام شده و تحلیل ریسک نیمه‌کمی برای سد چاه‌نیمهٔ زابل باتوجه به تحلیل خطر زلزله در محل موردنظر به‌دست آمده‌است؛ به‌طوری‌که این سد در دسته‌بندی ریسک متوسط قرار می‌گیرد و نیاز به طراحی مجدد و یا تقویت بدنهٔ سد نیست. نتایج این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تحلیل ریسک لرزه‌ای سدهای دیگر کشور مورداستفاده قرار گیرد.*

واژه‌های کلیدی تحلیل خطر، تحلیل ریسک، زلزله، سد چاه‌نیمه.

Seismic Hazard and Risk Analysis of Dam (Case Study: Chah Nimeh Dam)

A. Komak Panah   H. R.. Rahmani

Abstract *In the history, Earthquakes have been a major source of many damages and human losses and there has always been a lot of concern about the destruction of large structures such as dams due to significant financial losses and casualties caused by it as well as the uncontrolled release of water in the towns and villages located downstream. Seismic risk analysis, one of the most important methods to deal with earthquake hazards. In this study a type of seismic risk analysis in dams is discussed and used and seismic hazard analysis is conducted for the Chah Nimeh Zabol dam. Semi-quantitative risk analysis for Chah Nimeh Zabol dam by seismic hazard analysis for the location of the dam was conducted which placed it in the medium risk category and there is no requirement to redesign or reinforce the dam body. The results can be used as a guide for seismic risk of the dams.*

key Words Hazard Analysis, Risk Analysis, Seismic, Chah Nimeh Dam.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۰/۲۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۸/۱۵ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس   **Email:** a-panah@modares.ac.ir

(۲) دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکدهٔ مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

مقدمه

آمار زلزله‌های به‌وقوع‌پیوسته در سراسر جهان نشان‌دهندهٔ آن است که آن دسته از سدهای خاکی که تحت تأثیر زلزله قرار گرفته‌اند رفتارهای مختلفی از آسیب و نشست‌های جزئی تا تخریب کامل از خود نشان داده‌اند. بنابراین توجه به خطرات ناشی از تخریب احتمالی سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر مشخصات طراحی خواهد داشت.

باتوجه به اهمیت سازه‌هایی مانند سدها، تحلیل خطر و تحلیل ریسک زلزله در سدها از مسائل مهم در طراحی و تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد که در چند دههٔ اخیر مورد بررسی و مطالعهٔ بیشتری قرار گرفته‌است.

از گذشته تاکنون تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی برای سدها انجام شده‌است. سدها اولین سازه‌هایی هستند که دربرابر زلزله طراحی شده‌اند (۱۹۳۰)؛ حتی هنگامی‌که برای پروژه‌های سد اطلاعات لرزه‌خیزی موجود نبود، ازضریب زلزلهٔ ۰/۱ برای تحلیل شبه‌استاتیک (Pseudo-static analysis) استفاده می‌شد.

در سال ۱۹۸۹، کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ دنیا (ICOLD) [1] اولین نسخهٔ راهنمای انتخاب پارامترهای زلزله برای سدهای بزرگ را منتشر کرد که در آن تأکید شده بود که سدها باید دربرابر حداکثر زلزلهٔ موردانتظار (Maximum Credible Earthquake (MCE)) مقاوم باشند. این راهنما در سال ۲۰۱۰ به‌روزرسانی شد و در این نسخه حرکت زمین تحت زلزله (تاریخچهٔ شتاب- زمان) برای سدها توصیه شد به این‌صورت که چندین تاریخچهٔ شتاب- زمان متفاوت برای نمایش حرکت زمین در طراحی انتخاب شود و این تاریخچهٔ شتاب- زمان به‌وسیلهٔ نمودارهای شتاب‌نگاشت واقعی از شرایط مشابه سایت سد تحت مطالعه انتخاب شود.

درمورد تحلیل ریسک لرزه‌ای سدها، در سال‌های قبل از ۲۰۰۰ میلادی بیشتر مباحث تحلیل ریسک به‌صورت کیفی مورد بررسی قرار می‌گرفت.

یجیان و همکاران [2] در مقاله‌ای به چگونگی بررسی تحلیل خطر زلزله درمورد سدهای خاکی پرداخته‌اند و برای سدهای خاکی دو حالت خرابی را درنظر گرفته‌اند.

گاوس چالک و همکاران [3] در مقاله‌ای ضوابط تحلیل خطر لرزه‌ای سدها در کشور انگلیس را مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها لرزه‌خیزی مناطق مختلف کشور انگلیس را توسط نقشه‌هایی مشخص کرده‌اند و ضوابط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ دنیا را [1] مورد بررسی قرار داده‌اند و ضوابطی را برای طراحی سدهای جدید و تحلیل خطر لرزه‌ای سدهای در دست بهره‌برداری پیشنهاد نموده‌اند.

استفانیشین [4] در مقاله به ارائهٔ توصیه‌هایی برای طراحی سدها باتوجه به ریسک پرداخته‌است و این توصیه‌ها شامل برآورد ریسک سدهای موجود در دست بهره‌برداری نمی‌باشد. وی سدهای در حال ساخت را به دو دستهٔ موقتی و دائمی تقسیم نموده‌است و برای هر کدام مقدار ریسک مجاز را مشخص کرده‌است و توصیه‌هایی برای طراحی سدها باتوجه به درنظر گرفتن ریسک ارائه داده‌است.

در سال‌های بعد از ۲۰۰۰ میلادی بیشتر مباحث تحلیل ریسک سدها به‌روش‌های نیمه‌کمی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

نصیر و همکاران [5] در مقاله‌ای، تحلیل خطر لرزه‌ای سد کافرین را بررسی نموده‌اند. ساختگاه این سد برروی گسل فعال مصر قرار دارد و حداکثر بزرگای زلزله برابر و یا بزرگ‌تر از ۷/۵ برروی این گسل مورد انتظار است.

ویلند [6] در مقاله‌ای به بررسی نکاتی پرداخته‌است که مهندس طراح سد باید از آنها در تحلیل خطر زلزله اطلاع داشته باشد و در طراحی‌ها درنظر بگیرد. بعد از معرفی روش بورا [7] اکثر مقالات بااستفاده از این روش به بررسی تحلیل ریسک سدهای مورد مطالعه پرداخته‌اند.

توسان و همکاران [8] در مقاله‌ای به بررسی تحلیل ریسک لرزه‌ای ۳۲ سد کشور ترکیه که در حوضهٔ آبریز یوفرات واقع شده‌اند و دارای ارتفاع بیش از ۳۰ متر

می‌باشند، پرداخته‌اند. این مقاله به‌طور کامل درمورد تحلیل ریسک نیمه‌کمی در سدها بحث نموده و از روش بورا [7] در این مقاله استفاده گردیده‌است.

مولداوان و همکاران [9] در مقاله‌ای به بررسی تحلیل ریسک لرزه‌ای سدهای موجود در دو رودخانهٔ سیرت و بیستریتا در کشور رومانی پرداخته‌اند. برای تحلیل خطر زلزله از روش تحلیل خطر احتمالاتی و برای تحلیل ریسک زلزله از روش بورا [7] استفاده شده‌است.

استفاده از تحلیل ریسک زلزله و استفاده از آن در فرایندهای تصمیم‌سازی می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در به‌سازی و اقتصادی کردن روند تعمیر، تقویت و یا حفظ وضعیت موجود سازه داشته باشد. کاهش خسارت ناشی از یک زلزله با اعمال ملاحظات فنی و اقتصادی در قالب خطر و ریسک زلزله بر مبنای احتمالاتی می‌تواند ایدئال‌ترین گزینهٔ موجود در حال حاضر باشد.

معرفی
تحلیل ریسک لرزه‌ای

تحلیل ریسک فراهم‌کنندهٔ ساختار و انجام سیستماتیک در بحث احتمال حوادث و عواقب رخداد حادثه است و از اجزای ضروری برای فرایند مدیریت ایمنی می‌باشد. تحلیل ریسک شامل انتخاب حرفه‌ای بین ریسک‌های مختلف و بین هزینه‌ها و منافع است.

هدف آنالیز ریسک برآورد احتمال شکست سد یا اجزای سد و عواقب بعدی آن است. خروجی آنالیز ریسک تلاش می‌کند ساختار تئوری را معرفی کند تا کارایی سد در عمر طراحی سد پیش‌بینی شود و برآورد ریسک خصوصیت فیزیکی سد نباشد و نمایش ریاضی و احتمالاتی درمورد کارایی آیندهٔ سد باشد.

فرایند تحلیل ریسک ممکن است از کشوری به کشور دیگر متفاوت باشد و برآورد ریسک عواملی مانند اجتماعی، قانونی و... و قضاوت درمورد این‌که تحلیل ریسک در فرایند تصمیم‌گیری وارد شود از کشوری تا کشور دیگر کاملاً متفاوت است. شرایط تغییرات ریسک به انسان‌ها، اقتصاد، ارکان‌های دولتی و خصوصی مالک سد و ساختارهای اجتماعی و زیست‌محیطی بستگی دارد.

فرایند آنالیز ریسک در سه گروه طبقه‌بندی می‌شود: الف) مطالعات کیفی (Qualitative)، ب) مطالعات نیمه‌کمی (Semi-Quantitative) و ج) مطالعات کمی (Quantitative). روش‌های نیمه‌کمی دقیق‌تر از روش‌های کیفی هستند و روش‌های کمی دقیق‌تر از روش‌های نیمه‌کمی به بررسی ریسک می‌پردازند. روش‌های واضحی که به‌طور کامل بتوانند تحلیل ریسک کمی برای سدها را انجام دهند، در حال حاضر وجود ندارند [10].

تحلیل ریسک لرزه‌ای کیفی

بررسی‌های انجام‌شده برروی منابع و مراجع مختلف بین‌المللی درخصوص تعیین حداقل تحلیل‌های لرزه‌ای مورد نیاز برای سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای، براساس دسته‌بندی و پتانسیل‌های خطر پیش‌بینی‌شده، نشان‌دهندهٔ آن است که یک اجماع کلی در این باره وجود ندارد و هر یک از مراجع بسته به شرایط محیطی و لرزه‌ای و نیز شکل و ابعاد سدهای ساخته‌شده در آن کشور پیشنهادهای متفاوتی را ارائه نموده‌اند. در کشور ایران در نشریهٔ شمارهٔ ٦٢٤ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راه‌بردی رئیس‌جمهور [١١] روش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ دنیا[1] ارائه شده‌است. در این تحقیق از این روش استفاده شده‌است.

روش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ

عوامل مؤثر در گزینش پارامترهای لرزه‌ای. تعیین سطح زلزله در طراحی و در تحلیل لرزه‌ای یک سد بسیار حائز اهمیت است. عدم توجه به این نکته می‌تواند به غیراقتصادی و یا غیرایمن شدن طرح منجر شود. برای این منظور لازم است دو عامل میزان خطر لرزه‌ای ساختگاه سد و میزان خطرپذیری سازه مورد توجه قرار گیرند.

الف) میزان خطر لرزه‌ای ساختگاه سد: برمبنای بیشینه مقادیر شتاب زمین (Peak Ground Acceleration (PGA)) در سطح خطر لرزه‌ای حداکثر زلزلهٔ مورد انتظار،

میزان خطر ساختگاه به چهار بخش قابل تقسیم‌بندی است (جدول ۱):

جدول ۱ دسته‌بندی خطر لرزه‌ای در ساختگاه سد برمبنای بیشینه مقادیر شتاب زمین [1]

شرایط	درجهٔ خطر (میزان خطر)
PGA<0.1g	I (کم)
0.1g<PGA<0.25g	II (متوسط)
PGA>0.25g و هیچ گسل فعالی تا فاصلهٔ ۱۰ کیلومتری وجود ندارد	III (زیاد)
PGA>0.25g و یک گسل فعال در فاصلهٔ کمتر از ۱۰ کیلومتر وجود دارد	IV (خیلی زیاد)

ب) میزان خطرپذیری سد: میزان خطرپذیری سد براساس گنجایش مخزن و ارتفاع آن، تعداد افرادی که هنگام زلزله باید تخلیه شوند و آسیب‌های بالقوهٔ پایین‌دست تعیین می‌شود. اثرگذاری هر یک از این عوامل بر میزان خطرپذیری سد براساس مقادیری است (بین صفر تا ۱۲) که در جدول (۲) به تفکیک ارائه شده‌است. با جمع مقادیر مربوط به هر یک از این عوامل، میزان خطرپذیری یک سد تعیین می‌گردد. درنهایت این میزان عددی بین صفر تا ۳۶ خواهد بود.

با محاسبهٔ میزان خطرپذیری کل (براساس جمع مقادیر هر یک از عوامل مذکور در جدول (۲)، درجهٔ خطرپذیری آن سد را می‌توان از جدول (۳) تعیین نمود. در این طبقه‌بندی دستهٔ I دارای کمترین خطر و دستهٔ IV دارای بیشترین خطر می‌باشند.

جدول ۲ عوامل مؤثر در میزان خطرپذیری سد [1]

عامل خطرپذیری	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم
گنجایش مخزن (میلیون مترمکعب)	>120 (6)	1-120 (4)	0.1-1 (2)	<0.1 (0)
ارتفاع سد (متر)	>45 (6)	30-45 (4)	15-30 (2)	<15 (0)
تعداد افرادی که در زمان خطر باید تخلیه شوند	>1000 (12)	100-1000 (8)	1-100 (4)	هیچ (0)
آسیب بالقوهٔ پایین‌دست	زیاد (12)	متوسط (8)	کم (4)	هیچ (0)

جدول ۳ درجهٔ خطرپذیری سد [1]

عامل خطرپذیری کل	درجهٔ خطرپذیری (میزان خطرپذیری)
(0-6)	I (کم)
(7-18)	II (متوسط)
(19-30)	III (زیاد)
(31-36)	IV (خیلی زیاد)

بر این اساس، برای سدهایی با میزان خطرپذیری پایین یا متوسط، به‌کار بردن روش‌های ارزیابی ساده نظیر تحلیل شبه‌استاتیک به شرطی که مصالح پی و بدنهٔ سد مستعد کاهش شدید سختی و یا مقاومت نباشند، ممکن است قابل قبول باشد ولی در سدهایی با درجهٔ خطرپذیری زیاد و در ساختگاه‌هایی با خطر لرزه‌ای زیاد لازم است تحلیل‌های دقیق‌تر مورد توجه قرار گیرد؛ اما در هر حال به‌منظور دست‌یابی به اطلاعات اولیه از نحوهٔ تأثیر خصوصیات زلزله بر سد توصیه می‌شود همواره تحلیل‌های ساده نظیر تحلیل شبه‌استاتیک پیش از تحلیل‌های تفصیلی مدنظر قرار گیرد.

تحلیل ریسک لرزه‌ای نیمه‌کمی

رابطهٔ بورا. در این قسمت به بیان رابطهٔ بورا [7] پرداخته شده‌است. در این رابطه آورده شده‌است که برای سدهایی که احتمال زمین لرزه‌های شدید و متوسط در آنها وجود دارد باید تحلیل ریسک زلزله انجام گیرد و این تحلیل نیازمند داشتن اطلاعات جامع و کافی از سدها شامل نام، نوع سد، اهداف اجرای سد، سال تکمیل یا به‌سازی، محل، ابعاد، ظرفیت مخزن و خطر پایین‌دست می‌باشد و باید برنامه‌ریزی برای موارد ضروری وجود داشته باشد.

در این قسمت ضریب مجموع ریسک (TRF) توسط فرمول (۱) معرفی شده‌است:

$$TRF=[(CRF+HRF+ARF)+DHF]*PDF \qquad (۱)$$

(CRF+HRF+ARF): تأثیر سازهٔ سد که شامل مجموع ضرایب ریسک ظرفیت (CRF) و ارتفاع (HRF) و سن سد(ARF) می‌باشد.

DHF: ضریب خطر پایین‌دست براساس ریسک جمعیت.

PDF: نرخ صدمه‌پذیری (تابعی از خطر لرزه‌ای سایت سد).

۱) تأثیر سازهٔ سد: شامل ضریب ریسک مخزن (CRF) و ضریب ریسک ارتفاع (HRF) است و نشان‌دهندهٔ این است که ارتفاع سد یا مخزن بزرگ توانایی جریان زیاد سیل را دارد. ضریب ریسک سن (ARF) نمایش‌دهندهٔ این است که سدهای قدیمی صدمه‌پذیری بیشتری نسبت به سدهای جدید دارند. مقادیر ضریب ریسک سازهٔ سد در جدول (٤) و (٥) آورده شده‌است.

۲) خطر پایین‌دست: مجموع ضریب خطر پایین‌دست از فرمول (۲) محاسبه می‌گردد:

$$DHF=ERF+DRI \qquad (۲)$$

که (ERF) در آن ضریب تخلیهٔ پایین‌دست است و بستگی به جمعیت پایین‌دست دارد و(DRI) نشانهٔ ریسک خرابی پایین‌دست است که بستگی به خصوصیات اقتصادی، صنعتی، دولتی و خصوصی در مسیر سیل دارد. این ضرایب از ترکیب شاخه‌های سد، نقشهٔ سیلابگیر و مطالعات اقتصادی به‌دست می‌آیند. DHF (پتانسیل خطر پایین‌دست) هنگامی‌که اطلاعات جدیدی از تعمیرات سد، به‌سازی و... وجود داشته باشد باید به‌روزرسانی شود (جدول ٦). هنگامی‌که اطلاعات زیادی از DRI , ERF براساس مطالعات جزئی وجود نداشته باشد از جدول (۷) استفاده می‌شود.

جدول ٤ ضرایب حجم مخزن و ارتفاع سد [7]

عامل ریسک	سهم در مجموع مقدار ریسک			
	شدید	زیاد	متوسط	کم
ظرفیت (CRF) (acre-feet)	٥۰۰۰۰< (٦)	۱۰۰۰-٥۰۰۰۰ (٤)	۱۰۰-۱۰۰۰ (۲)	۱۰۰> (۰)
ارتفاع (HRF) (feet)	۸۰< (٦)	٤۰-۸۰ (٤)	۲۰-٤۰ (۲)	۲۰> (۰)

جدول ۵ ضریب سن سد [7]

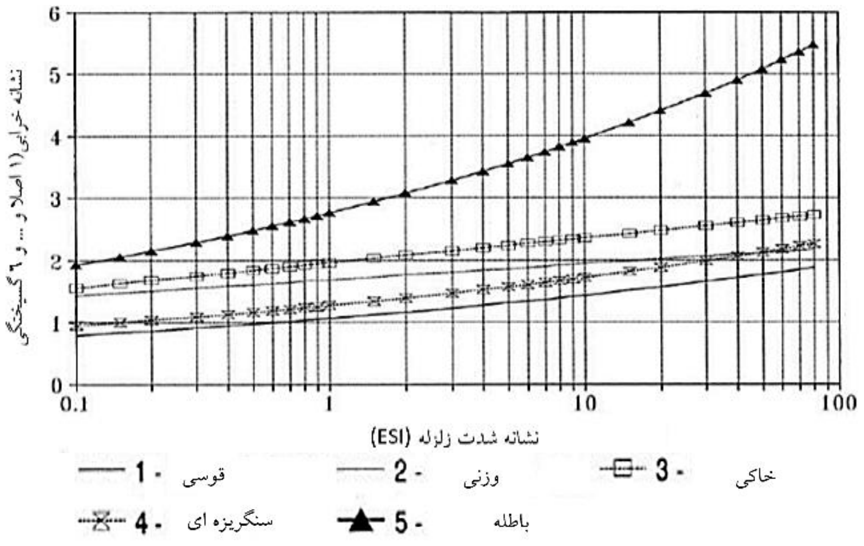
سال ساخت سد	۱۹۰۰>	۱۹۲۵–۱۹۰۰	۱۹۵۰–۱۹۲۵	۱۹۷۵–۱۹۵۰	۲۰۰۰–۱۹۷۵	۲۰۰۰<
سن سد (ARF)	٦	٥	٤	٣	٢	١

جدول ٦ تعیین ضریب ریسک پایین‌دست [7]

عامل ریسک	سهم درمجموع مقدار ریسک			
	شدید	زیاد	متوسط	کم
تعداد افراد که باید تخلیه شوند (ERF)	۱۰۰۰< (۱۲)	۱۰۰–۱۰۰۰ (۸)	۱–۱۰۰ (٤)	هیچ (۱)
ریسک خرابی پایین‌دست (DRI)	زیاد (۱۲)	متوسط (۸)	کم (٤)	اصلا (۱)

جدول ۷ تعیین ضریب ریسک پایین‌دست هنگامی‌که اطلاعات ضعیف باشد [7]

نرخ پتانسیل خطر پایین‌دست	از بین رفتن افراد زنده	خرابی اقتصادی و محیط زیستی	فاکتور خطر پایین‌دست (DHF)
کم	بدون از دست رفتن افراد	خیلی کم	۲
قابل توجه	بدون از دست رفتن افراد	بله	۱۲
زیاد	احتمالاً یک نفر یا بیشتر	بله	۲٤



شکل ۱ شاخص خرابی پیش‌بینی‌شده [7]

۳) ضریب صدمه‌پذیری لرزه‌ای: در این قسمت برای به‌دست آوردن ضریب PDF مراحل زیر طی می‌شود:
ابتدا مقدار نشانهٔ شدت زلزله (ESI) از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید:

$$ESI=PGA*(M-4.5)^3 \quad (۳)$$

که در آن PGA برحسب g و M بزرگی گشتاوری یا ریشتر می‌باشد. سپس از روی شکل (۱) مقدار نشانهٔ خرابی پیش‌بینی‌شده (PDI) مشخص می‌شود.
سپس مقدار PDF از رابطهٔ (٤) محاسبه می‌گردد:

$$PDF=2.5*PDI \quad (٤)$$

٤) تعیین دسته‌بندی ریسک: مرحلهٔ نهایی تحلیل دسته‌بندی سدها براساس مقدار TRF در رده‌های I (ریسک کم) تا IV (ریسک شدید) در جدول (۸) نمایش داده شده‌است.

جدول ۸ تعیین دسته‌بندی ریسک سد[7]

مجموع ضرایب ریسک (TRF)	دسته‌بندی ریسک سد
۲ تا ۲۵	I (کم)
۲۵ تا ۱۲۵	II (متوسط)
۱۲۵ تا ۲۵۰	III (زیاد)
بزرگ‌تر از ۲۵۰	IV (شدید)

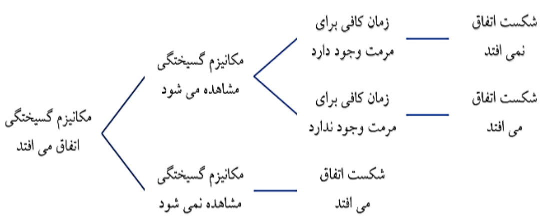
روش فوق روشی سریع برای به‌دست آوردن مقدار ریسک سدهای بزرگ می‌باشد و مقدار TRF راهنمایی مناسب برای ایمنی سدهای موجود و ضرورت انجام تحلیل‌های دیگر در صورت بحرانی بودن است.

تحلیل ریسک کمی

اصول عمومی تحلیل ریسک کمی که راهنمای خوبی برای به‌کار بردن مباحث ایمنی سد می‌باشد درطی ۱۰ تا ۱۵ سال اخیر مورد بحث قرار گرفته‌است. راهنمایی برای تحلیل ریسک کمی سد توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ [9]، کمیتهٔ ملی سدهای بزرگ استرالیا [12] (ANCOLD) و مؤسسهٔ فدرالی امریکا [13] (FEMA) ارائه شده‌است که در این تحقیق روش کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ بررسی شده‌است.

بولتن ۱۳۰ کمیسیون بین‌المللی

سدهای بزرگ [10]. تحلیل ریسک کمی شامل تحلیل دقیق تمامی عوامل تأثیرپذیر از سد می‌باشد. هدف نهایی تحلیل ریسک، بررسی کمی احتمال و عواقب شکست سد می‌باشد (شکل ۲). اجزای هر سیستم می‌تواند به‌صورت یک سیستم نمایش داده شود و می‌تواند به زیرسیستم‌هایی، مانند بدنهٔ سد یا سرریز بتنی، تبدیل شود و زیرمجموعهٔ بعدی نیز به مؤلفه‌های پایه‌ای، مانند هستهٔ سد و ریپ رپ محافظ تبدیل می‌شود.

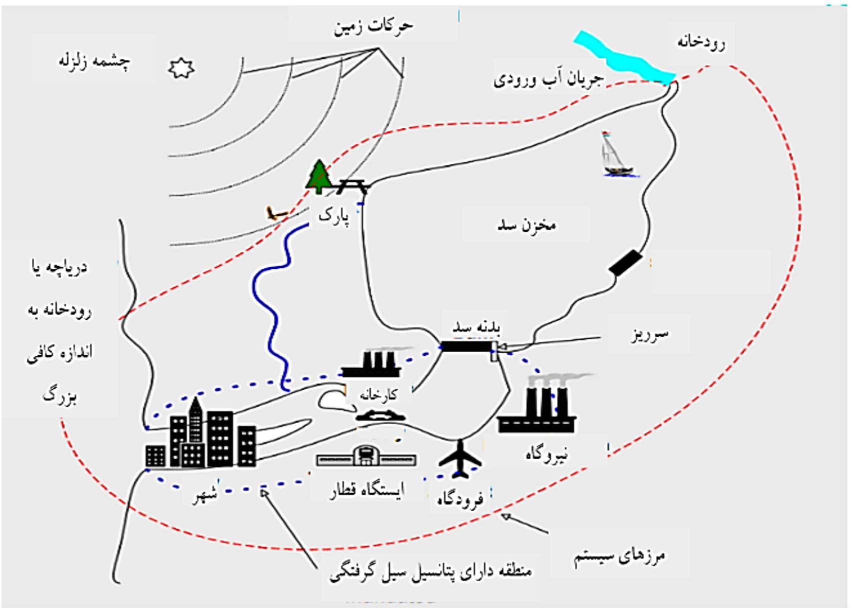


شکل ۲ دیاگرام کلی نمایش ریسک شکست [10]

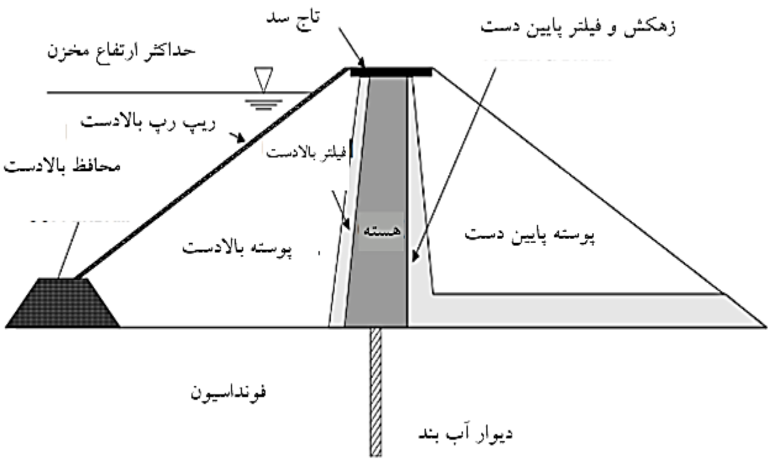
سد، مخزن رودخانه یا حوضهٔ آبگیر زیرمجموعه‌های مختلف برای نمایش دادن مدل است. این مدل‌سازی به‌وسیلهٔ روش‌های متفاوتی می‌تواند انجام شود و بسته به هدف تحلیل ریسک، روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی سیستم و عملکرد آن مورد نیاز است.

مشخص کردن سیستم موردنظر و مرزها بحث مهمی در فرایند تصمیم‌گیری علمی است. در این روش باید مرزهای سیستم و عوامل تأثیرپذیر به‌خوبی مشخص شده باشند. علاوه‌بر آن، مشخص کردن سیستم و زیرمجموعه برای تحلیل، مهم است و روش واحدی برای مشخص کردن این مرزها وجود ندارد (شکل ۳).

فرایند تحلیل ریسک شامل مجموعه‌ای از زیرسیستم‌هاست که می‌تواند دارای زیرمجموعه‌هایی باشد و ارتباط زیرمجموعه‌ها با یکدیگر می‌تواند قسمتی از فرایند کامل باشد (شکل ٤).



شکل ۳ مرزهای سیستم مورد بررسی [10]



شکل ٤ مشخص کردن جزئیات سیستم [10]

مدهای گسیختگی نشان می‌دهند که چگونه المان‌ها یا مؤلفه‌هایی که گسیخته می‌شوند، می‌توانند سیستم یا زیرمجموعه‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. برای مثال مدهای گسیختگی سد خاکی به‌طور وسیعی گسترده‌اند و عواملی مانند روگذری، فرسایش داخلی، حرکت توده و عدم پایداری شیروانی را شامل می‌شوند. این دسته‌بندی کلی مدهای گسیختگی نیز گسترده است و برای هر مؤلفه با عمیق شدن در سیستم گسترده می‌شود. به هر حال این زیرسیستم‌ها نیز می‌توانند به زیرسیستم‌های دسته سوم تقسیم شوند. احتمال گسیختگی هر یک از زیرمجموعه‌ها به‌شکل احتمالاتی مانند شکل (۵) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مکانیزم گسیختگی و فرایند فیزیکی حوادث براساس قوانین طبیعی است. مکانیزم گسیختگی نیز واحد نیست و نمایش آن بستگی به‌روش سیستم و تابع گسیختگی دارد.

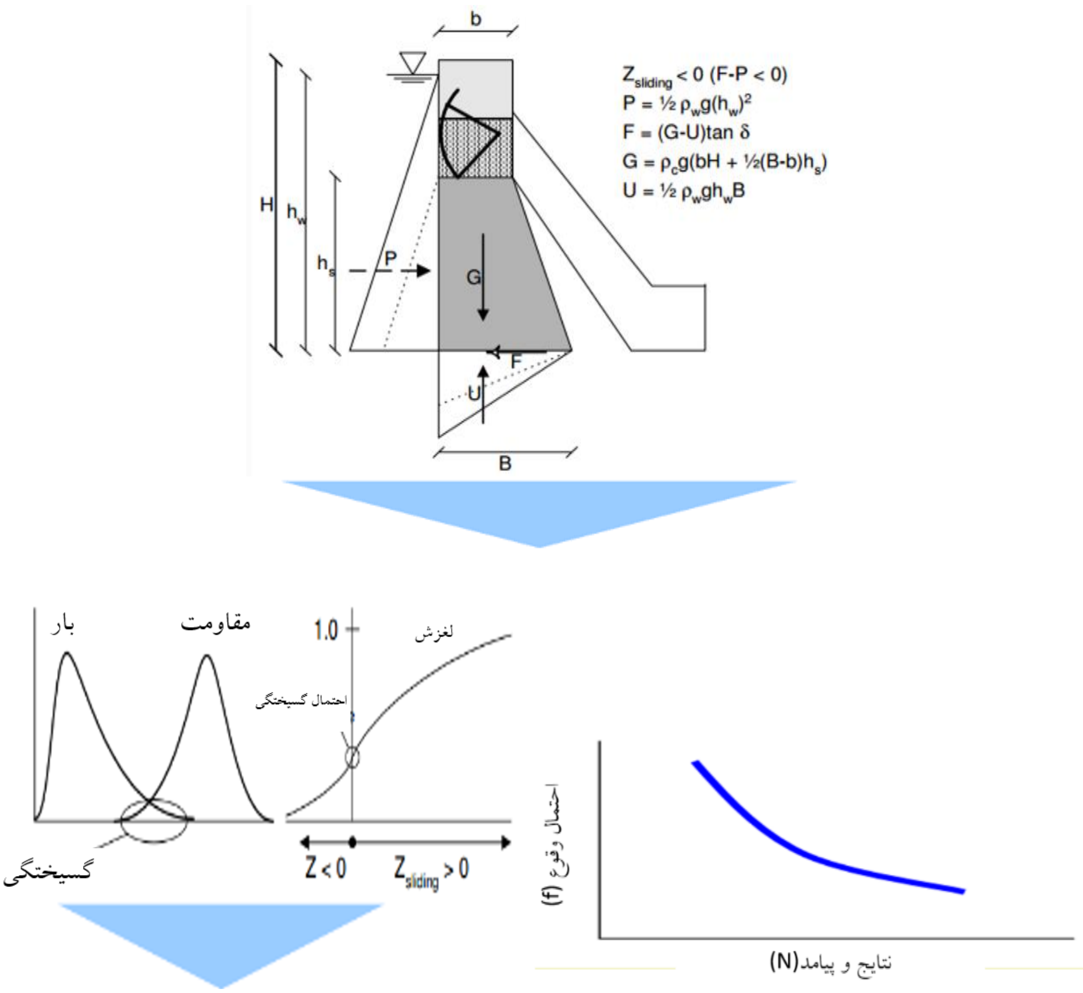
ملاحظات کامل خطر و ریسک سد که پتانسیل خطر عظیمی برای پایین‌دست دارد، می‌تواند برای مراکز مدیریت بحران برای طراحی، نگه‌داری و عملیات بلندمدت مفید و مؤثر باشند. بنابراین قسمت مهمی از مبحث ایمنی سدها و پایین‌دست از خروجی‌های تحلیل ریسک است.

روش‌های کمی مانند روش‌های مورد تحقیق در تحلیل درخت وقایع (Event Tree Analysis(ETA)) و دیگر تحلیل‌ها مانند تحلیل عواقب شکست سد از روش‌های موجود در تحلیل ریسک است.

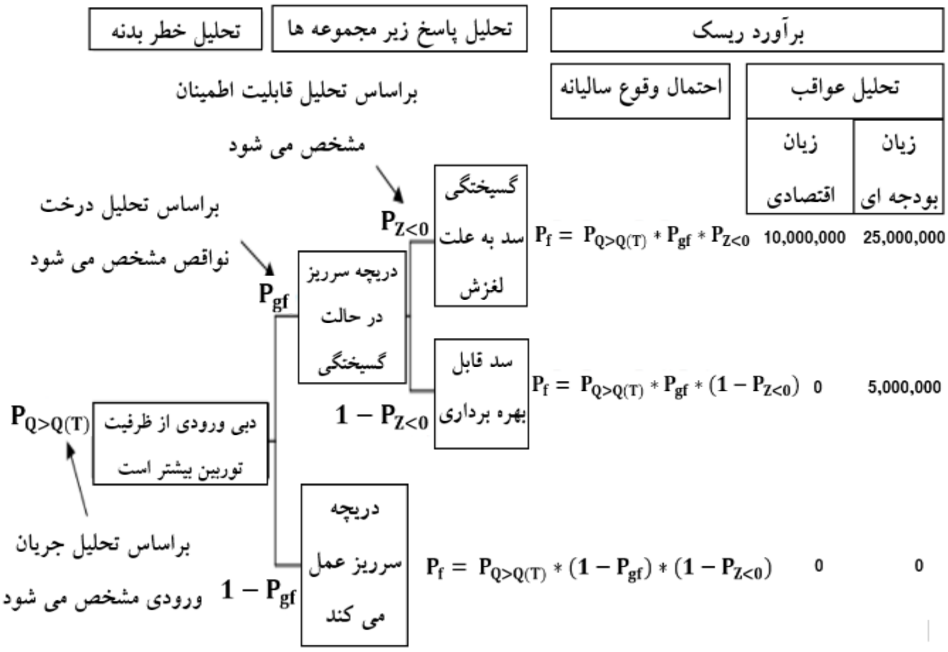
مدهای گسیختگی و آنالیز عواقب آن (Failure Modes and Effects Analysis (FMEA)) روشی مقایسه‌ای از آنالیز می‌باشد که برای نقص خاصی یا برای حالت کامل نقص‌ها به‌کار می‌رود. این روش می‌تواند به چندین صورت و برای هدف‌های زیادی به‌کار رود.

تحلیل درخت وقایع به‌طور گسترده توسط مهندسان برای حالت‌های وقایع و عواقب آن به‌کار می‌رود که می‌تواند برای سد نیز بین عملکرد و شکست حالت‌های مختلف سیستم استفاده شود (شکل ٦).

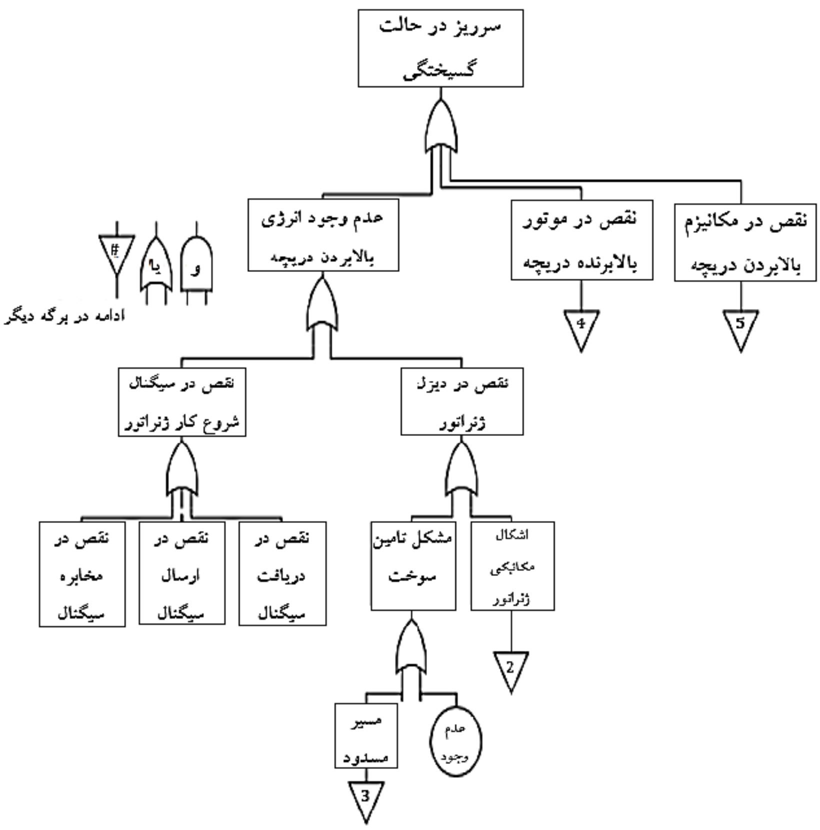
تحلیل درخت نواقص (Fault Tree Analysis (FTA)) تخصیص مقدار ریسک باتوجه به احتمال برای هر شاخهٔ درخت وقایع است (شکل ۷).



شکل ۵ احتمال گسیختگی زیرمجموعه‌های سیستم [10]



شکل ۶ مثال درخت وقایع ریسک سد [10]



شکل ۷ مثال درخت نواقص ریسک سد [10]

به‌کار بردن احتمال برپایهٔ داده‌ها و مدل‌های پدیده‌شناسی است. با داده‌های زیاد و درک تئوری پایه‌ای پدیده‌ها، تحلیل‌های آماری روش‌های مناسبی برای پیش‌بینی می‌باشند. در حالت اطلاعات کافی و موجود بودن روش‌های مناسب انجام تحلیل به‌صورت آماری مناسب است. در حالت اطلاعات ضعیف و روش‌های نامناسب تحلیل‌های آماری دارای عدم قطعیت‌های زیادی هستند. قضاوت و تصمیم درست با افزایش داده‌های مناسب و روش‌های مناسب به‌طور صحیح‌تری انجام می‌شود.

همهٔ موارد بالا نیازمند موارد زیر است:

۱) داده‌های کامل و زیاد (دربارهٔ وقایع و شکست سد).

۲) به‌کار بردن پدیده‌شناسی خطرهای مدل که پایهٔ مدهای شکست سد است.

۳) مدل‌سازی شکست و مکانیزم نقص سد.

تحلیل ریسک چهارچوبی برای درنظر گرفتن دانش و قضاوت متخصصان سد برای برآورد ریسک است و درصورت دقت زیاد در تحلیل ریسک کمی تصمیم‌گیری‌ها با صرفهٔ اقتصادی همراه می‌باشد.

سد چاه‌نیمهٔ ۱ زابل [14]

مجموعه دریاچه‌های چاه‌نیمه در موقعیت جغرافیایی N3047 E6135 در استان سیستان و بلوچستان واقع شده‌است. چاه‌نیمه‌ها که چهار گودال طبیعی آب را شامل می‌شود در ۳۵ کیلومتری زابل در شهرستان زهک قرار گرفته‌است. در مواقع کم‌آبی، آب آشامیدنی تمام منطقهٔ سیستان و شهرستان زاهدان و نیز قسمتی از آب کشاورزی سیستان از این دریاچهٔ مصنوعی تأمین می‌شود.

هدف از انجام تحلیل خطر

هدف از تحلیل خطر زلزله تعیین پتانسیل وقوع زلزله در آینده بااستفاده از تئوری احتمالات در تخمین مقادیر جنبش نیرومند زمین به‌ازای سطوح مختلف طراحی می‌باشد. مراحل انجام کار را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱) شناسایی چشمه‌های لرزه‌زا و مدل سازی آنها. ۲) گرداوری کاتالوگ زلزله‌های گسترهٔ طرح و تعیین پارامترهای لرزه‌خیزی. ۳) بررسی روابط کاهندگی موجود و انتخاب منطقی آنها. ٤) تعیین پتانسیل لرزه‌خیزی سرچشمه‌های لرزه‌زا در گسترهٔ طرح. ۵) تعیین مقادیر جنبش نیرومند زمین (حداکثر شتاب) در ساختگاه مورد نظر. ٦) بااستفاده از این مراحل مقادیر شتاب برروی سنگ بستر درجهت طراحی به‌ازای سطوح مختلف به‌دست می‌آید.

تحلیل خطر زلزله به‌عنوان ورودی تحلیل‌های ریسک زلزله می‌باشد و از اهمیت زیادی برخوردار است.

نتایج

نتایج تحلیل خطر زلزله. در این تحقیق ابتدا گسل‌هایی که به شعاع ۱۵۰ کیلومتر اطراف سد قرار دارد مشخص گردیده‌است و تحلیل خطر قطعی (Deterministic) برای محل موردنظر انجام گردیده‌است و سپس زلزله‌های تاریخی و دستگاهی از سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۵ برای منطقه جمع‌آوری شده‌است و پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها از آن حذف شده‌اند و حذفیات ضروری روی این داده‌ها صورت گرفته‌است تا کاتالوگ زلزله به‌دست آید. سپس با نرم‌افزار اکسل پارامترهای رابطه بازگشتی گوتنبرگ- ریشتر به‌دست آمده‌است. به وسیله برنامه نویسی در نرم‌افزار متلب چند کد برای محاسبهٔ پارامترهای منحنی خطر و نمودارهای متناظر با آن رسم شده‌اند و نتایج به‌شرح زیر مشخص گردیده‌است.

۱) شناسایی گسل‌های منطقه: گسل‌ها باتوجه به سابقه و میزان فعالیت آنها برای استفاده در مطالعات تحلیل خطر به چهار گروه زیر تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

الف) گسل‌های فعال: گسل‌هایی که سابقهٔ فعالیت در دوران کوارترنر در آنها دیده شده‌است.

ب) گسل‌هایی که احتمال فعالیت دارند: گسل‌هایی که کمتر از ۲ میلیون سال عمر دارند و در مناطق فعال

تکتونیکی قرار دارند اما هنوز فعالیتی از آنها دیده نشده‌است.

ج) گسل‌هایی که اطمینانی به فعالیت یا عدم فعالیت آنها نیست.

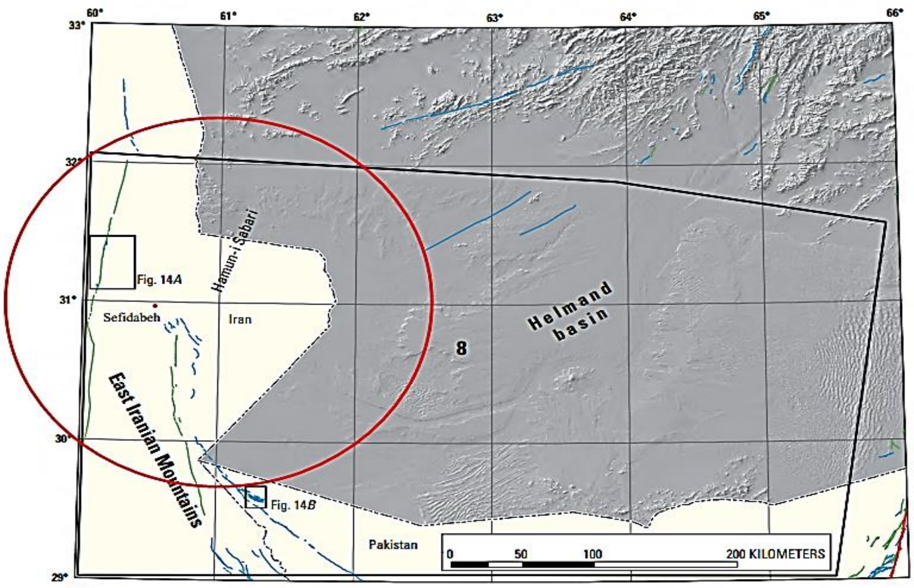
د) گسل‌های غیرفعال.

علت این امر آن است که بسیاری از گسل‌های شناخته‌شده، در سالیان دور(صدها یا میلیون‌ها سال پیش) حرکت نموده‌اند، ممکن است امروز فعال نباشند. گسل‌های فعال، پایهٔ تحلیل خطر منطقه هستند ولی برای دقت بیشتر و مقادیر واقعی خطر می‌بایست گسل‌های نوع ۲ و ۳ که در بالا توضیح داده شده‌است را نیز در محاسبات تاحدی لحاظ نمود. برای شناسایی گسل‌های فعال و تعیین میزان فعالیت آنها می‌توان از اطلاعات زمین‌شناسی نظیر خزش در گسل‌ها، به‌وجود آمدن چشمه‌های جدید و عدم فرسایش دیواره‌های گسل در روی زمین و... استفاده کرد.

در نقشهٔ گسل‌های ایران که توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [15] تهیه شده‌است، انواع گسل‌های فعال موجود به‌همراه نوع آن از نظر فعالیت و حرکت در کل ایران آورده شده‌است. در این تحقیق از نقشهٔ گسل‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور [16] که تعداد گسل بیشتری در آن مشخص گردیده‌است، نیز استفاده شده‌است.

بررسی گسل‌های فعال در کشورهای افغانستان و پاکستان در منطقهٔ مورد مطالعه. باتوجه به این‌که شعاع ۱۵۰ کیلومتری اطراف سد چاه‌نیمه هم در کشور پاکستان و هم در کشور افغانستان قرار می‌گیرد، با مراجعه به مطالب موجود در سایت‌های اینترنتی (USGS [17] و...) این نکته مشخص می‌شود که در قسمت جنوب غربی افغانستان و شمال شرقی پاکستان گسل‌های فعالی وجود ندارد و نقشهٔ گسل‌های ایران نیز می‌تواند تأییدکنندهٔ این نتیجه‌گیری باشد که در فاصلهٔ کمتر از ۱۵۰ کیلومتری غربی سد چاه‌نیمه هیچ‌گونه گسلی حتی کوچک نیز مشاهده نمی‌شود. در شکل (۸) نقشهٔ گسل‌های افغانستان و پاکستان و لرزه‌خیزی این دوکشور آورده شده‌است.

همان‌طور که در شکل (۱۰) مشخص شده‌است هیچ گسلی از کشور افغانستان در داخل محدودهٔ مورد مطالعهٔ ما قرار نمی‌گیرد و برای مطالعهٔ تحلیل خطر زلزله باید گسل‌های داخل ایران مورد مطالعه و بررسی قرار بگیرند.



شکل ۸ بررسی گسل‌های موجود در افغانستان و پاکستان [17]

محاسبات تحلیل خطر قطعی

در این پروژه از نقشهٔ گسل‌های فعال پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و نقشهٔ گسل‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران استفاده شده‌است.

فرضیات مورداستفاده در این پروژه به صورت زیر می‌باشد:

۱) تمام گسل‌ها در طول گسل رفتار یکسان دارند. ۲) تمام گسل‌ها امتداد لغز می‌باشند. ۳) شعاع ۱۵۰ کیلومتر برای بررسی تحلیل خطر استفاده می‌شود. ٤) در محاسبات از بزرگای گشتاوری (M_w) استفاده شده‌است. ۵) در محاسبهٔ بزرگای گشتاوری از رابطهٔ بزرگا– طول گسیختگی برای زلزله‌های ایران استفاده شده‌است که توسط زارع [18] ارائه شده‌است (رابطهٔ ۵):

$$M_w = 0/91 \ln L_R + 3/66 \qquad (۵)$$

که در آن L_R طول گسیختگی گسل است که برابر ۳۷ درصد طول واقعی گسل (L_F) منظور شده‌است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، رابطهٔ بالا با همگن کردن بزرگاهای مختلف زلزله‌های ایران براساس بزرگای گشتاوری M_w بیان شده‌است. تحلیل خطر به‌روش قطعی براساس PGA می‌باشد.

از رابطهٔ کاهندگی زارع [18] که در زیر آمده‌است استفاده می‌کنیم (رابطهٔ ٦):

$$PGA = aM + bX - \log X + C_i S_i + \sigma.\rho \log A \qquad (٦)$$

A: پارامتر جنبش شدید زمین (حداکثر شتاب).

M: بزرگای گشتاوری (M_w).

X: فاصلهٔ کانونی (km) که از رابطهٔ $X = \sqrt{d^2 + h^2}$ به‌دست می‌آید. در این رابطه d فاصلهٔ رومرکزی و h عمق کانونی می‌باشد.

C_i : ضریب ساختگاه S_i.

σ : انحراف معیار.

S_i : چهار نوع است و باتوجه به نوع ساختگاه یکی از چهار C_i که در جدول (۹) آمده‌است لازم می‌باشد (مثلاً اگر نوع خاک S_3 باشد $c_3 = 1$ و بقیهٔ Cها صفر است).

اگر تحلیل خطر به‌روش قطعی باشد $\sigma.\rho$ حذف می‌شود و در تحلیل خطر به‌روش احتمالاتی استفاده می‌شود.

در جدول (۱۰) دسته‌بندی خاک‌ها براساس سرعت موج برشی آورده شده‌است.

جدول ۹ مقادیر استفاده‌شده برای فرمول زارع [18]

Zone(comp)	a	b	C_1	C_2	C_3	C_4	σ
Central Iran and Alborz(H)	۰/۳۲۲	−۰/۰۰۰۳	−۰/۸۲۸	−۰/۷۵٤	−۰/۹۷۱	−۰/۷۸۸	۰/۳۵۲
Central Iran and Alborz(V)	۰/۳۲۲	−۰/۰۰۰٤	−۰/٦۸۸	−۰/٤۵۸	−۰/۷۲۰	−۰/۵۸۵	۰/۳۹٤
Zagros(H)	۰/٤۰٦	−۰/۰۰۳۸	−۱/۲٦۲	−۱/۳۳۳	−۱/۲۳۰	−۱/۷۷۷	۰/۳۵٦
Zagros(V)	۰/۳۹۹	−۰/۰۰۱۹	−۱/۰٤۷	−۱/۰٦۵	−۱/۰۲۰	−۰/۹۷۵	۰/۳۲۹
Total of Iran(H)	۰/۳٦۲	−۰/۰۰۰۲	−۱/۱۲٤	−۱/۱۵۰	−۱/۱۳۹	−۱/۰٦٤	۰/۳۳٦
Total of Iran(V)	۰/۳٦۰	−۰/۰۰۰۳	−۰/۹۱٦	−۰/۸۵۲	−۰/۹۰۰	−۰/۸۵۹	۰/۳۳۳

جدول ۱۰ دسته‌بندی نوع خاک سایت [18]

Site class	متوسط سرعت موج برشی در ۳۰ متر اول خاک
C_1: Rock	$۷۰۰ < V_{s30}$
C_2: Hard Allovium	$۵۰۰ < V_{s30} < ۷۰۰$
C_3: soft Allovium	$۳۰۰ < V_{s30} < ۵۰۰$
C_4: Soft Soil	$V_{s30} < ۳۰۰$

محاسبات تحلیل خطر به‌روش قطعی براساس نقشهٔ گسل‌های فعال پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله [15]. دراین قسمت باتوجه به نقشهٔ گسل‌های فعال پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تحلیل خطر زلزلهٔ سد چاه‌نیمه انجام گردیده‌است. در شکل (۹) محل قرارگیری سد چاه‌نیمه و محدودهٔ اطراف آن و گسل‌های واقع در محدوده مشخص شده‌است.

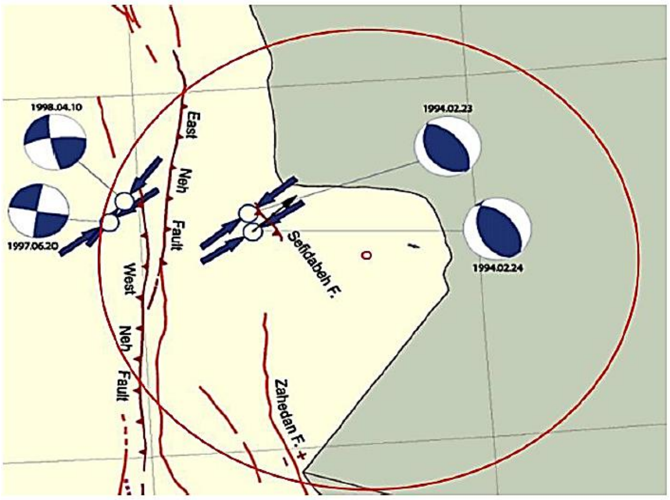
در جدول (۱۱) محاسبات مربوط به گسل‌های قرارگرفته در شکل فوق آورده شده‌است.

همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود بیشترین مقدار PGA برابر ۰/۲۷۹g و برای گسل زاهدان می‌باشد.

محاسبات تحلیل خطر به‌روش قطعی براساس نقشهٔ گسل‌های فعال سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران [16]. در این قسمت باتوجه به نقشه گسل‌های سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی تحلیل خطر زلزلهٔ سد چاه‌نیمه انجام گردیده‌است. در شکل (۱۰) محل قرارگیری پروژه و محدودهٔ اطراف آن و گسل‌های واقع در محدوده مشخص شده‌است.

در جدول (۱۲) محاسبات مربوط به گسل‌های قرارگرفته در شکل فوق آورده شده‌است.

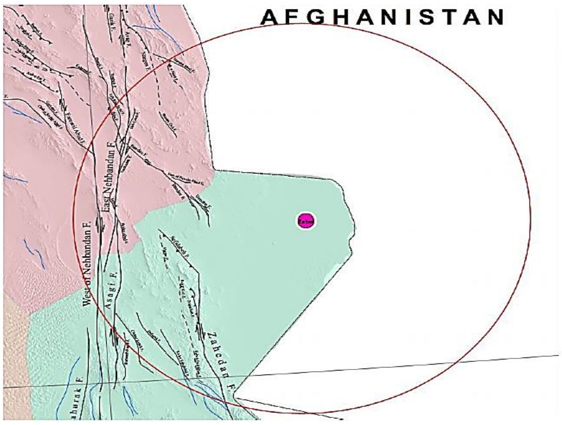
همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود بیشترین مقدار PGA برابر ۰/۲٦۹g و برای گسل زاهدان می‌باشد.



شکل ۹ موقعیت گسل‌های اطراف محل مورد نظر [15]

جدول ۱۱ محاسبات تحلیل خطر قطعی براساس نقشهٔ پژوهشگاه

گسل	Lf (Km)	M_w	D(Km)	X(Km)	logA	PGA
سفیدابه	15	5.219556	26	36.06938	-0.81387	0.153507
شرق نهبندان	65	6.553923	62	66.85058	-0.60496	0.248339
زاهدان	48	6.278023	37	44.65423	-0.52515	0.298436
آساگی	38	6.065434	62	66.85058	-0.78179	0.165277
پاداگوک	19	5.43467	68	72.44998	-1.04618	0.089913
کوه صاحبداد	11	4.937315	73	77.16217	-1.25453	0.055651
غرب نهبندان	67	6.581501	66	70.5762	-0.61927	0.240287



شکل ۱۰ موقعیت گسل‌های اطراف محل مورد نظر [16]

جدول ۱۲ محاسبات تحلیل خطر قطعی براساس نقشهٔ سازمان زمین‌شناسی

گسل	Lf(Km)	M_w	D(Km)	X(Km)	logA	PGA
صاحب‌داد خان	64	6.539814	112	114.7563	-0.85431	0.139857
کوه صاحب‌داد	47	6.258865	132	134.3466	-1.02839	0.093673
زاهدان	106	6.99896	85	88.60023	-0.57053	0.268824
چهل کوره	37	6.041166	145	147.1394	-1.14925	0.070916
پاداگوک	53	6.368196	137	139.2623	-1.0054	0.098764
آساگی	86	6.808686	129	131.4002	-0.81913	0.151659
سفیدابه	45	6.219293	85	88.60023	-0.85277	0.140355
دوپارکوه	35	5.990597	96	99.20181	-0.98676	0.103095
رپارکوه	21	5.525746	98	101.1385	-1.16382	0.068577
مامار	30	5.85032	100	103.0776	-1.05496	0.088112
شرق نهبندان	141	7.258602	131	133.3642	-0.6631	0.217221
غرب نهبندان	94	6.889629	141	143.1992	-0.82953	0.148069
بندان	80	6.742875	68	72.44998	-0.57261	0.267542
شرق حسین‌آباد	15	5.219556	85	88.60023	-1.21468	0.060999
ناسفنده	16	5.278286	134	136.3121	-1.39006	0.040733
اسماعیل‌آباد	33	5.937052	145	147.1394	-1.18694	0.065021
تمام ده	25	5.684407	111	113.7805	-1.16007	0.069172
حسن‌آباد	19	5.43467	141	143.1992	-1.35623	0.044032
ده گرم	19	5.43467	142	144.1839	-1.3594	0.043712
زاهو	29	5.81947	145	147.1394	-1.22951	0.058951
لاح کوه سفید	40	6.112111	136	138.2787	-1.09483	0.080385
نرگس	27	5.754442	137	139.2623	-1.22758	0.059214
تیغ نوآب	22	5.568079	135	137.2953	-1.28847	0.051467
حیدرآباد	22	5.568079	126	128.4562	-1.2578	0.055233
استین	17	5.333455	132	134.3466	-1.36339	0.043313

جدول ۱۳ توزیع زلزله‌های اتفاق‌افتاده در منطقهٔ مورد نظر

M_w	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.9	4	4.1
N	1	1	1	1	3	2	1	1	2	1
M_w	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	5.1
N	2	5	5	6	3	5	1	5	2	3
M_w	6.7	5.2	5.3	5.4	5.6	5.7	5.9	6	6.5	6.7
N	1	2	4	1	2	2	2	1	2	1

محاسبات تحلیل خطر احتمالاتی (Probabilistic)

در این قسمت محاسبات مربوط به تحلیل خطر احتمالاتی ارائه می‌گردد.

ایجاد و تنظیم کاتالوگ. برای به‌دست آوردن لرزه‌های رخ‌داده در ایران از پایگاه داده‌های USGS و پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده‌است. به‌منظور ارزیابی احتمالاتی لرزه‌خیزی منطقهٔ مورد مطالعه بااستفاده از کاتالوگ‌های مختلف، لیست زلزله‌های رخ‌داده در شعاع ۱۵۰ کیلومتری سد جمع‌آوری شده‌است. حداقل بزرگی مورد اعتماد برای زلزله برای رخدادهایی که بزرگای گشتاوری بزرگ‌تر از ۳ دارند، درنظر گرفته شده‌است (جدول ۱۳). پس از حذف داده‌های کمتر از این مقدار بزرگی در بازه‌های زمانی ذکرشده، زلزله‌هایی که در پایگاه داده‌های زمین‌لرزه یکسان هستند و درواقع نشان‌دهندهٔ یک زلزله هستند، حذف شدند.

حذف پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها. بعد از یکسان‌سازی واحدهای بزرگا، پس‌لرزه‌ها و پیش‌لرزه‌ها براساس معیار گاردنر و نوپوف [19] حذف شده‌اند. بدین منظور یک برنامه در نرم‌افزار متلب نوشته شد و به‌طور خودکار پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها از کاتالوک حذف شدند.

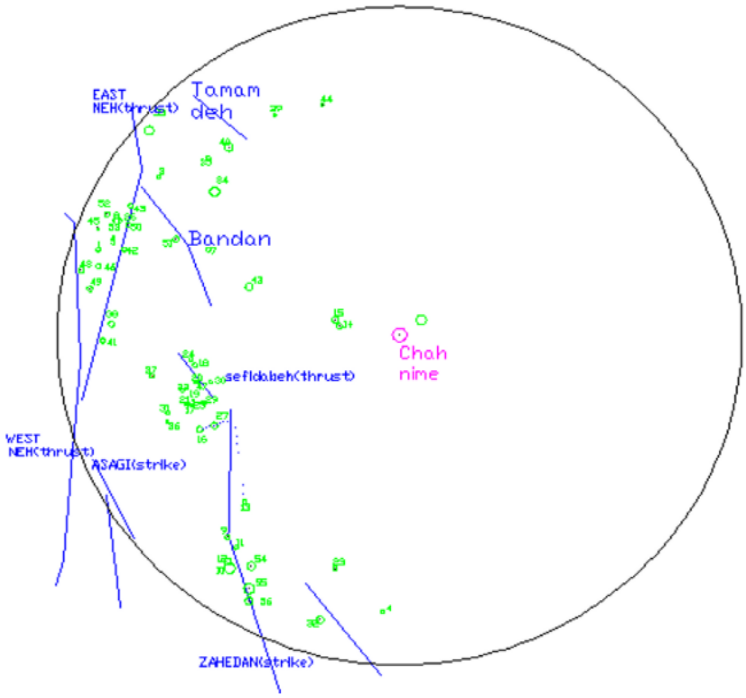
محاسبهٔ پارامترهای گوتنبرگ- ریشتر ($\log N_m = a-bM$) *[20]*. نظر به اهمیت بسیار زیاد این پارامترها در تعیین میزان خطر زمین‌لرزه، در این مقاله از روش کیکو و سلوول [21] استفاده شده‌است که برمبنای تابع توزیع دو کراندار گوتنبرگ- ریشتر و روش آماری تخمین بیشینه بنا گردیده‌است. این روش دارای قابلیت‌های بسیار زیادی به‌خصوص در به‌کارگیری رویداد زمین‌لرزه‌های آمیخته و ناهمگون دارد که مشابه شرایط داده‌های لرزه‌ای ایران می‌باشد؛ بدین صورت که امکان استفادهٔ توأم از زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی سدهٔ بیستم با انجام دسته‌بندی‌های مناسب با درنظر گرفتن عدم قطعیت در اعلام بزرگای زمین‌لرزه‌ها (خطای بزرگا) و بزرگای آستانهٔ متفاوت برای هر دسته وجود دارد.

به‌علت کوچک بودن منطقه و کمبود داده‌ها از یک منحنی گوتنبرگ- ریشتر برای کل منطقه استفاده شده‌است (جدول ١٤).

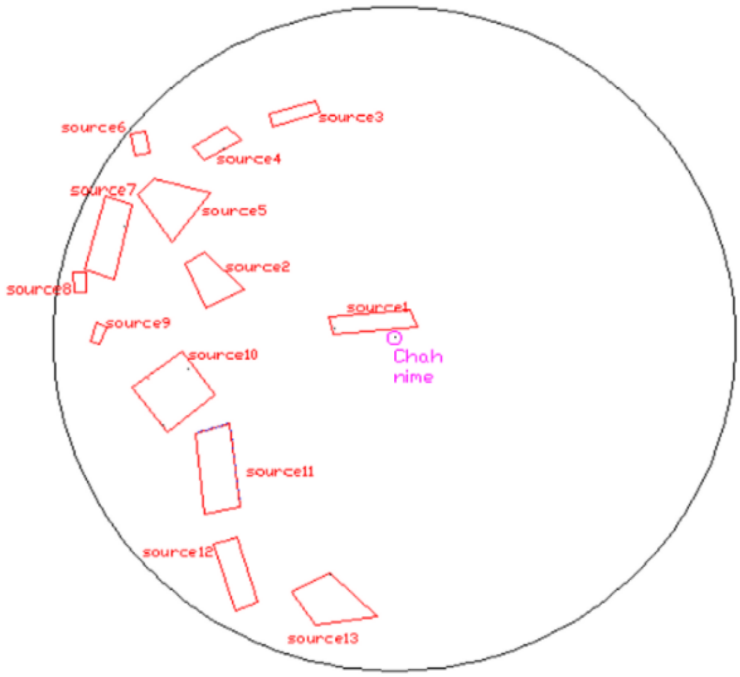
جدول ١٤ پارامترهای رابطهٔ گوتنبرگ- ریشتر

a	b	α	β	μ
٤/١٦٣٩	٠/٦٣١٨	٥/١٢٢	١/٤٥	٠/٥٠٧

مشخص کردن سرچشمه. درواقع یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحلیل خطر، تعیین سرچشمه‌هاست. برای این کار ابتدا در نرم‌افزار گسل‌های فعال و هم‌چنین زمین‌لرزه‌های رخ‌داده ترسیم می‌گردد (شکل ١١) و درنهایت باتوجه به ابعاد گسل‌ها و پراکندگی زلزله‌ها در اطراف آنها با یک قضاوت مهندسی، خطی بودن و یا سطحی بودن سرچشمه‌ها مشخص می‌شوند (شکل ١٢).



شکل ۱۱ توزیع زلزله‌ها در ناحیهٔ مورد نظر



شکل ۱۲ چشمه‌های درنظر گرفته‌شدهٔ زلزله

انتخاب بزرگای بیشینهٔ هر چشمه. باتوجه به چشمه‌های مختلف و ویژگی‌های آنها بزرگای بیشینه برای هر چشمه مشخص می‌شود و برای تعیین بزرگا از رابطهٔ ولز و کاپراسمیت [22] (جدول ۱۵) استفاده می‌شود.

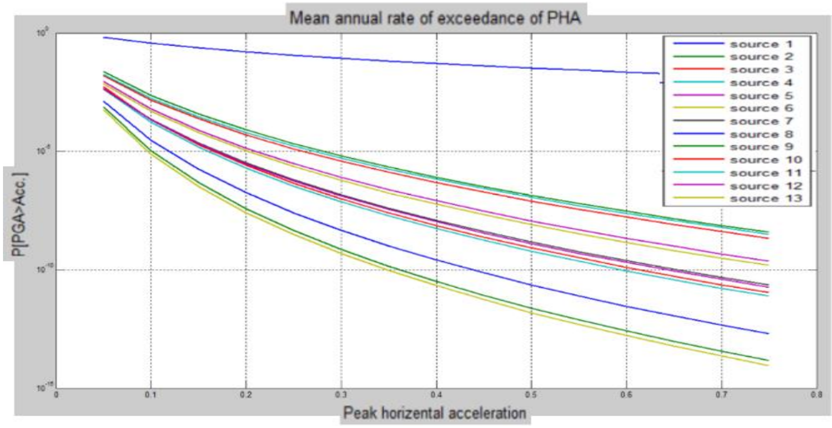
محاسبات تحلیل خطر احتمالاتی. تمام محاسبات برای هر چشمه به‌روش تحلیل خطر احتمالاتی انجام می‌گیرد (شکل ۱۳) و نتایج با یکدیگر ترکیب می‌شوند تا جواب نهایی به‌دست آید (شکل ۱٤) [23].

تحلیل خطر زلزله. همان‌طور که در بالا مشاهده شد مراحل مختلف تحلیل خطر به‌روش قطعی و احتمالاتی انجام گردید و تحلیل خطر قطعی برای دو نقشهٔ گسل‌های پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام گردید و نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت ارائه‌شده در جدول (۱٦) می‌باشد.

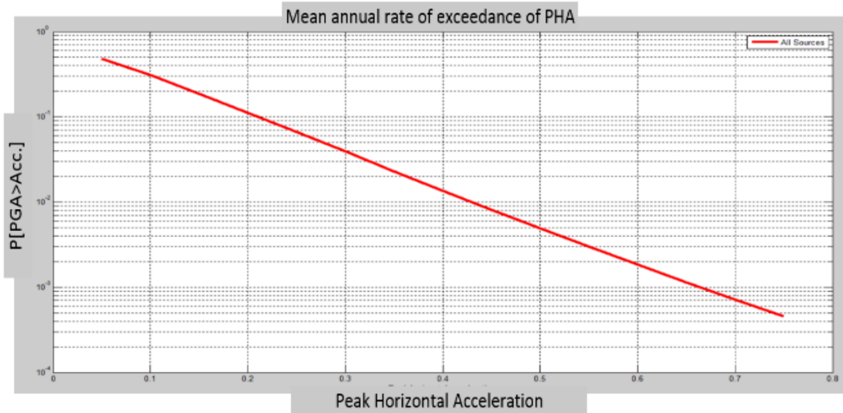
به‌عنوان ترکیب حالت قطعی و احتمالاتی پیشنهاد به‌صورت زیر می‌باشد (جدول ۱۷).

جدول ۱۵ بزرگای بیشینهٔ چشمه‌ها برای رابطهٔ ولز و کاپراسمیت

source	Criteria	Type	Lf	Mw(max)---Mu
source1	Area	All	419.2207	6.639993834
source2	Area	All	367.5188	6.583973922
source3	Area	All	181.6343	6.284013887
source4	Area	All	219.5877	6.364775899
source5	Area	All	694.0057	6.854535746
source6	Area	All	74.25741	5.903324974
source7	Area	All	696.7166	6.856195041
source8	Area	All	169.9162	6.255630034
source9	Area	All	58.28563	5.800250271
source10	Area	All	788.0053	6.908598553
source11	Area	All	908.1715	6.969004491
source12	Area	All	440.0387	6.660621072
source13	Area	All	971.9176	6.997876848



شکل ۱۳ منحنی توزیع خطر چشمه‌های مختلف



شکل ۱٤ منحنی توزیع خطر مجموع چشمه‌ها

جدول ۱۶ نتایج تحلیل خطر قطعی

نقشه	شتاب حداکثر
پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله	۰/۲۷۹
سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	۰/۲۶۹

جدول ۱۷ نتایج تحلیل خطر احتمالاتی

دورهٔ بازگشت			
۵۰سال	۴۷۵سال	۹۷۵سال	۲۴۷۵سال
۰/۱۰۵	۰/۱۹۵	۰/۲۳۴	۰/۲۷۹

تحلیل ریسک نیمه‌کمی سد چاه‌نیمه

در این قسمت از روش Bureau (2003) برای سد چاه‌نیمه استفاده می‌شود.

۱) ضریب ریسک سد چاه‌نیمه با حجم 53550acree-feet (٦٦ میلیون مترمکعب) باتوجه به جدول (٤) در دسته‌بندی High قرار می‌گیرد و مقدار آن عدد ٤ می‌باشد.

CRF=4

۲) ضریب ریسک سد چاه‌نیمه با ارتفاع 54feet (۱۷ متر) باتوجه به جدول (٤) در دسته‌بندی High قرار می‌گیرد و مقدار آن عدد ٤ می‌باشد.

HRF=4

۳) سد چاه‌نیمه در سال ۱۳۵۸ به اتمام رسیده‌است و باتوجه به جدول (۵) ضریب ریسک آن عدد ۲ می‌باشد.

ARF=2

خطر پایین‌دست. مجموع ضریب خطر پایین‌دست از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

DHF=ERF+DRI

برای سد چاه‌نیمه تعداد افراد پایین‌دست در دسته‌بندی کم قرار می‌گیرد و عدد 4 مقدار آن می‌باشد.

ERF=4

برای سد چاه‌نیمه پتانسیل خطر پایین‌دست در دسته‌بندی کم قرار می‌گیرد و عدد 4 مقدار آن می‌باشد.

DRI=4

مجموع ضریب خطر پایین‌دست از فرمول زیر محاسبه می‌گردد:

DHF=ERF+DRI=4+4=8

ضریب صدمه‌پذیری لرزه‌ای. در این قسمت برای به‌دست آوردن ضریب PDF مراحل زیر طی می‌شود:

ابتدا مقدار نشانهٔ شدت زلزله (ESI) از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید و سپس مقدار PDF از رابطهٔ (٤) محاسبه می‌گردد:

برای سد چاه‌نیمه مقدار ESI برابر است با:

$ESI=0.279*(6.7-4.5)^3=2.971$

باتوجه به شکل (۱) مقدار PDI برابر است با:

PDI=2.13

و مقدار PDF برابر است با:

PDF=2.5*2.13=5.325

و مقدار TRF برابر است با:

TRF=[(CRF+HRF+ARF)+DHF]*PDF

TRF=[(4+4+2)+8]*5.325= 95.85

تعیین دسته‌بندی ***ریسک.*** سد چاه‌نیمه با مقدار TRF=95/5 در دستهٔ متوسط قرار می‌گیرد و نیازی به طراحی مجدد و یا تقویت بدنهٔ سد نیست.

نتیجه‌گیری

ملاحظات کامل خطر و ریسک سدهایی که هزینهٔ ساخت

و نگه‌داری بالایی دارند و پتانسیل بالای خرابی و پیامدهای فاجعه‌آمیزی برای پایین‌دست دارند، می‌تواند برای مراکز مدیریتی سدها به‌منظور طراحی، نگه‌داری و عملیات بلندمدت مورد استفاده قرار گیرد؛ بنابراین ایمنی سدها و پایین‌دست از اهداف تحلیل ریسک می‌باشد. از نتایج این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. تحلیل ریسک کیفی که تا قبل از سال ۲۰۰۰ به‌عنوان اصلی‌ترین روش تحلیل ریسک شناخته می‌شد امروزه کارایی چندانی در محاسبات تحلیل ریسک سدها ندارد.

۲. تحلیل ریسک نیمه‌کمی روش بسیار مناسبی برای برآورد اولیه و سریع سطح ایمنی و شرایط پایین‌دست سدها می‌باشد و روش Bureau (2003) روش مناسب و مورد قبولی برای تحلیل ریسک نیمه‌کمی سدها می‌باشد.

۳. تحلیل ریسک کمی نیازمند اطلاعات جامع و کافی از مشخصات سد و پایین‌دست سد است و نیازمند هزینه‌های زیادی می‌باشد و برای تصمیم‌گیری‌های کلان خیلی مفید و قابل استفاده می‌باشد. در کشور ما به‌دلیل اطلاعات نسبتاً کم از پایین‌دست معمولاً انجام آن با مشکلات زیادی همراه می‌شود.

٤. برای تحلیل خطر زلزلهٔ سدها باتوجه به اهمیت آنها باید تحلیل خطر قطعی و احتمالاتی به‌طور هم‌زمان انجام شود.

۵. مقدار حداکثر شتاب زمین برای سد چاه‌نیمه باتوجه به تحلیل خطر قطعی و احتمالاتی برابر ۰/۲۷۹ به‌دست آمد.

٦. تحلیل ریسک نیمه‌کمی برای سد چاه‌نیمه باتوجه به تحلیل خطر انجام‌شده در دستهٔ متوسط قرار می‌گیرد و نیازی به طراحی مجدد و تقویت بدنهٔ سد نیست.

۷. روش تحلیل ریسک نیمه‌کمی باتوجه به هزینه و زمان محاسباتی نسبتاً کم می‌تواند به‌عنوان گزینهٔ مناسب برای تحلیل ریسک کلیهٔ سدهای کشور استفاده گردد و با تغییرات در شرایط و اطلاعات می‌توان آن را به‌روز نمود.

مراجع

1. ICOLD, "Selecting Parameters for Large Dams-Guidelines and Recommendations", Bulletin72, (1989).
2. Yegian, M. K., Marciano, E. A. and Ghahraman, V. G., "Seismic Risk Analysis for Earth Dams", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, (1991).
3. Gosschalk, E. M., Severn, R. T., Charles, J. A. and Hinks, J. L., "An Engineering Guide to Seismic Risk to Dams in the United Kingdom, and its International Relevance", *Soil Dynamic and Earthquake engineering*, Vol. 13, (1994).
4. Stefanishin, D. V., "Evaluation of the Standard Safety of Dams on the Basis of Risk Criteria", *Hydrotechnical Construction*, Vol. 31, No. 2, (1997).
5. Nusier, O. K. and Shlash Alwaneh, A., "Kaferin Earth Dam Probabilistic Seismic Hazard Assessment", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 43, No. 6, (2006).
6. Wieland, Martin, "What Seismic Hazard Information the Dam Engineers Need from Seismologists and Geologists?", *Secound European Conference on Earthquake Engineering an seismology*, Istanbul, (2014).

7. Bureau. G. J., Chenh, W.F., Scawthorn, C.(Eds), "Dams and Appurtenant Facilities in Earthquake Engineering Handbook". CRS press, Bora Raton, Pp. 26.1- 26.47, (2003).
8. Tosun. H., Zorluer. I., Orhan. A., Seyrek. E., Savas. H., Turkuz. M., "Seismic Hazard and Total Risk Analyses for Large Dams in Euphrates Basin, Turkey", *Engineering Geolog*y, Vol. 89, Pp. 155-170, (2007).
9. Moldavan. I., Constantin. A., Popesco. E., Tomadanila. D., Toader. V. E., Moldoveanu. T., Placinta. A., "Seismic Hazard and Risc Studies for ROMANIAN Large Dams Situated on BISTRITA and SIRET Rivers", *Secound European Conference on Earthquake Engineering an seismology*, Istanbul, (2014).
10. ICOLD, "Risk Assessment in Dam Safety- A Reconnaisance of Benefits, Methods and Current Applications", Bulletin130, (2005).

۱۱. «راهنمای تحلیل و طراحی لرزه‌های سدهای خاکی و سنگ‌ریز»، نشریهٔ شمارهٔ ٦٢٤معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راه‌بردی رئیس جمهور، (۱۳۹۲).

12. ANCOLD, "Guidelines on Risk Assessment", Australian National Committee On Large Dams, (2003).
13. FEMA, "Federal Guidelines for Dam Safety", (FEMA 93), (1993).

۱٤. شرکت مدیریت منابع آب ایران، «اطلاعات سد چاه‌نیمه».

۱۵. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله،«نقشهٔ گسل‌های فعال ایران»، (۱۳۸۲).

۱٦. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، «نقشهٔ گسل‌های ایران»، (۱۳۹۲).

17. United States Geological Survey, "Earthquake Hazards", (2015).

۱۸. زارع. م.، «رابطه‌های مناسب برای بزرگا، شدت و بیشینه شتاب افقی براساس زمین‌لرزه‌های ایران»، پژوهش‌نامهٔ زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، سال٤ ، شمارهٔ ٦، (۱۳۷٤).

19. Gardner, J. K., Knopoff L.,"Is the Sequence of Earthquake in southern California, with Aftershocks Removed, Poissonian?", Bulletin of Seismological Society of America, 64, (1974).
20. Gutenberg, B., Richter, C. F.,"Frequency of Earthquake in California", Bulletin of Seismological Society of America, 34, (1944).
21. Kijko, A., Sellevoll, M. A.," Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files, Part II, Incorporation of Magnitude Heterogeneity", Bulletin of Seismological Society of America, 82, (1992).
22. Wells, D. L., Coppersmith, K. J.,"New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement", Bulletin of Seismological Society of America, 84, (1994).

۲۳. خاجی، ن.، «مبانی زلزله‌شناسی مهندسی و تحلیل خطر زلزله»، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، (۱۳۹۲).